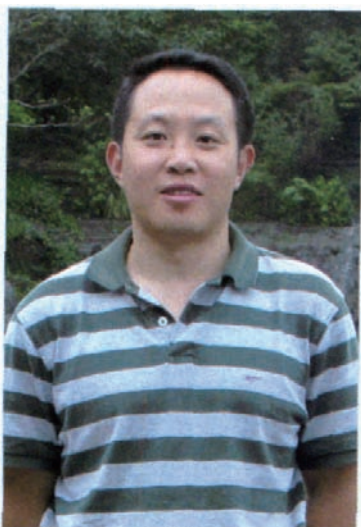


# 钛合金航空结构件的高效数控加工

## High-Performance NC Machining of Ti-Alloy Aircraft Structure Part

成都飞机工业(集团)有限公司数控加工厂 宋智勇 牟文平 阮超



宋智勇

高级工程师,曾从事多年数控设备维修、改造等工作,目前主要从事数控设备选型及应用技术等相关工作。

随着人们对现代飞机性能要求的提高,钛合金以其比强度高、机械性能好和耐腐蚀性能强等特点在现代飞机上的应用也越来越广泛,尤其是在高性能战斗机中,铝合金所占的比例已高达40%。图1所示是美军从20世纪70年代设计的眼镜蛇战机到现在的猛禽战机的主要材料

钛合金航空结构件的高效数控加工是目前航空制造业面临的难题之一。数控设备、加工工具和工艺方案3个方面目前的技术远远不能满足钛合金航空结构件的加工需求,这必将成为数控加工行业今后的研究热点,钛合金航空结构件的高效数控加工的需求也是推动数控技术发展的源泉。

比例变化情况。

随着钛合金在飞机上所占比重的不断增加,钛合金航空结构件的数控加工效率对航空制造企业的影响也越来越大。钛合金属于难加工材料,其相对切削性为0.15~0.25,加工效率仅为铝合金的10%,因此钛合金航空结构件的低加工效率严重制约了现代飞机的批量生产。如何实现钛合金航空结构件的高效加工成为了航空制造企业、数控设备制造商和刀具制造商共同关注的

话题。

### 钛合金航空结构件工艺特点

#### 1 钛合金切削加工性能

钛是地球上蕴藏最丰富的金属之一,在金属中排列第3,与其他金属相比具有机械性能好、抗腐蚀性能强以及比重小等特点。但是在实际

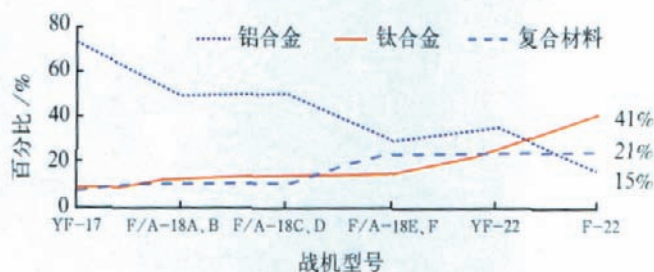


图1 美军历代飞机材料比例变化情况

加工中,钛合金的切削加工性能很差,主要表现在以下几个方面:

(1) 大切削力。钛合金材料强度高,在切削时产生的切削力是中碳钢的2倍,大的切削力导致切削刃口产生大量的切削热;

(2) 导热率低。钛合金热扩散率分别只有铁的1/4、铝的1/16,大量的切削热集中在切削区域,导致切削温度高达700℃;

(3) 刀尖应力大。钛合金的塑性低,加工产生的切屑极易弯曲,导致切屑与前刀面的接触长度短,只有45#钢的1/2~2/3,因此切削刃上单位面积压力增大,造成刀尖部位应力集中;

(4) 摩擦力大。一方面由于钛合金材料与刀具材料之间的摩擦系数比较大,另一方面由于钛合金的弹性模量小、屈强比大,造成前、后刀面的摩擦加剧;

(5) 化学活泼性高。钛元素在高的切削温度下,很容易与空气中的氢、氧、氮等气体发生化学反应,形成表面硬层,加速刀具磨损。同时钛元素也容易与刀具材料起化学反应,造成刀具材料的扩散,使刀具磨损严重。

## 2 钛合金航空结构件工艺特点

钛合金主要应用于高温区域的关键零部件,如隔热导风罩、机尾罩和后机身框段等。随着现代飞机为满足隐身、长寿命以及结构轻量化等方面的性能要求,钛合金航空结构件在飞机设计中被大量应用。航空结构件是飞机的主要承力部件,零件外形涉及机身外形、机翼外形及翼身融合区外形等复杂理论外形,且与多个零件进行套合,因此结构复杂,加工难度大;材料去除量大,材料去除率都在50%以上,部分零件甚至达到90%;薄壁、深槽腔特征占80%,为典型的弱刚性结构,加工状态极不稳定;零件装配协调面、交点孔等数量多,零件制造精度要求高(见图2)。

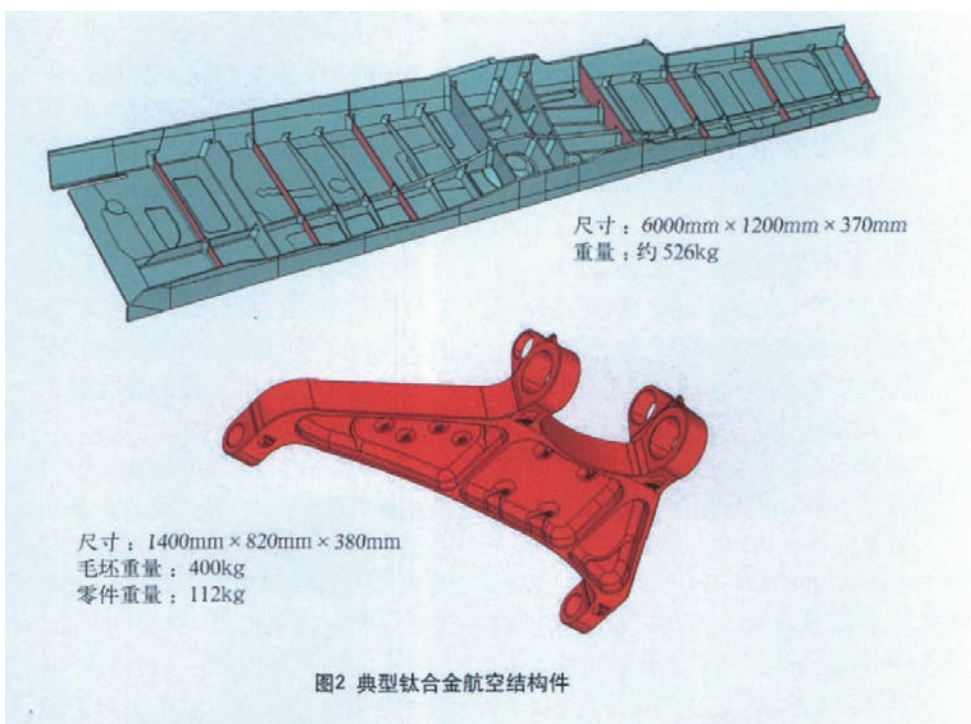


图2 典型钛合金航空结构件

因此钛合金航空结构件的切削加工性能很差,加工效率极低。

## 3 钛合金航空结构件加工现状

目前在钛合金航空结构件数控加工方面,传统加工方法采用低速大扭矩机床、高速钢和硬质合金刀具、低转速大切深的方式加工,其金属去除率普遍为30~60cm<sup>3</sup>/min,最高不超过200cm<sup>3</sup>/min;而对于铝合金的加工而言,目前,普遍采用高速加工方案,金属去除率普遍可达到500~2000cm<sup>3</sup>/min,最高可达到6000cm<sup>3</sup>/min。因此与铝合金相比,钛合金的加工效率仅为铝合金的1/20~1/10,加工效率极为低下。随着钛合金在飞机结构件中的大量应用,钛合金零件的加工效率问题将成为制约新一代战机研制、生产的瓶颈。

图3为铝合金和钛合金金属去除率的变化曲线,图中显示了1970~2005年之间单个

主轴的金属去除率的变化情况。由于铝合金一直是航空结构件的主要材料,铝合金的加工效率一直受到航空制造业的重视,尤其是在铝合金高速加工机床的大量应用后,铝合金的加工效率得到了大幅度的提高,到2005年铝合金加工的金属去除率达到了1970年的9.5倍;然而钛合金加工技术几乎在原地踏步,到2005年钛合金加工的金属去除率仅为1970年的1.5倍。因此在钛合金大量应用的今天,钛合金航空结构件的高效加工必将成为新技术发展的焦点。

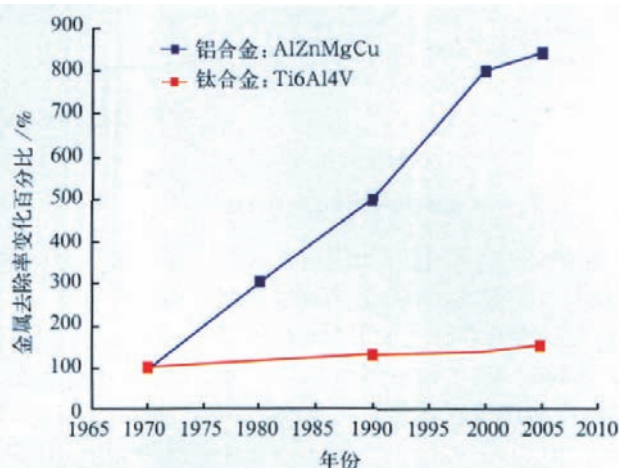


图3 铝合金、钛合金金属去除率的变化曲线

## 钛合金高效加工设备

由于钛合金航空结构件高效数控加工的需求非常迫切,许多航空数控机床制造商已经将产品研发的重点由铝合金加工转向钛合金高效加工,其中最为典型的是德国 DST 公司。DST 公司在 2005 年就已经开始了对钛合金高效加工设备的研究,开发出了 ECOFORCE 系列钛合金卧式加工中心,预计到 2010 年投放市场,该加工中心的金属去除率达到了  $600\text{cm}^3/\text{min}$ ,在现有的基础上提高了 3~6 倍。同时 FOREST-LINE、INGERSOLL 和 MCM 等公司针对钛合金高效加工也开发了相应的新产品。为了满足钛合金结构件的高效加工,新型的钛合金加工设备呈现出如下发展趋势:

(1) 大扭矩。由于钛合金强度高,导致加工中切削力非常大,钛合金机床的一个显著特点就是主轴扭矩和摆角扭矩大。在 DST 的 ECOFORCE 机床上,主轴扭矩达到了  $1100\text{N}\cdot\text{m}$ ,A、C 摆角扭矩为  $8000\text{N}\cdot\text{m}$ 。

(2) 电主轴的应用。大功率、

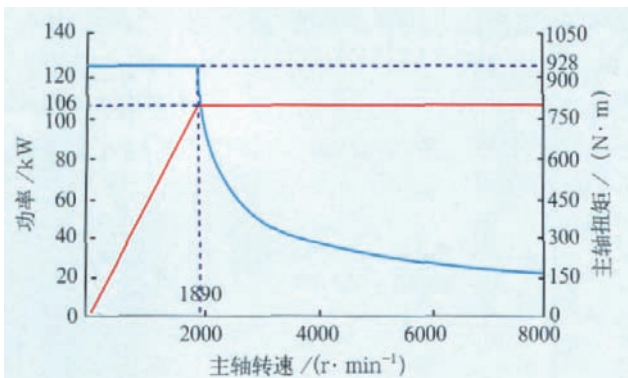


图4 POWERMILL功率扭矩

大扭矩的电主轴已开始应用于钛合金加工。INGERSOLL 公司推出的 POWERMILL 卧式加工中心配置了功率  $106\text{kW}$ 、主轴扭矩为  $928\text{N}\cdot\text{m}$  的电主轴用于钛合金加工,如图 4 所示。

(3) 卧式加工中心应用于钛合金加工。卧式加工中心排屑方便,有

利于提高加工效率和加工质量,可交换工作台易于实现多工位加工并组建柔性生产线,提高设备利用率。因此卧式加工是钛合金结构件高效加工的重要方式。目前最为新型的钛合金高效加工机床均采用了卧式加工的结构形式。目前卧式加工中心的工作台面宽度最大为  $2000\text{mm}$ ,因此该类设备不适用于超大型的钛合金结构件加工。

(4) 高压内冷。钛合金加工中切削热集中在刀尖,容易造成刀具磨损或损坏,高压内冷可以将冷却液尽可能地到达切削区域带走切削热,同时高压还带有碎屑和切屑排放的功能。主轴中心冷却是较老的一种技术,但是在高效钛合金加工设备上的主轴内冷对压力有更高的要求,普遍达到  $6\text{MPa}$  以上的高压,有的设备甚至达到了  $12\text{MPa}$  的压力。

## 钛合金高效加工刀具

刀具技术是数控加工的关键技术之一,也是限制难加工材料加工效率的一个技术瓶颈。随着刀具技术的进步,刀具材料和刀具结构不断改进,刀具种类越来越多,如何合理选

择刀具及切削参数成为提高数控加工效率的核心所在。

由于钛合金的切削加工性较差,传统加工方式切削速度一般不超过  $60\text{m}/\text{min}$ 。为提高钛合金的粗加工效率,钛合金的粗加工主要是以大切

深、低转速、低进给的方式来获得最大的金属去除率;精加工采用 PVD 涂层硬质合金刀具进行小切宽、大切深的高速铣削(切削速度超过  $170\text{m}/\text{min}$ )获得高的切削效率。因此钛合金加工刀具主要围绕如何在强力切削时避免振颤、减小切削力和降低切

削温度等方面进行改进。具体改进措施如下:

(1) 强力铣削刀具广泛应用。强力铣削刀具的刀体刚性好,刀片与刀体的牢固连接,刀具直径大,有效避免了切削中可能产生的振颤,主要刀具类型为用于开槽、侧铣的玉米铣刀。

(2) 高压内冷刀具的大量出现。刀具内部冷却液通过高压喷射到切削区域,直接对切削点的刀尖进行冷却,减小切削刃的温度和刀具磨损,同时高压液体打碎了切屑并及时将切屑排走。采用该类刀具可以获得更高的切削速度,提高加工效率;提高刀具寿命,降低刀具成本和加工暂停时间;良好的断屑和排屑效果改善了零件加工质量。

(3) 超密齿刀具,如图 5 所示。整体硬质合金刀具上开有 10 个以上切削刃的刀具是钛合金高效加工的新技术。该类刀具通过增加刀齿数



图5 超密齿刀具

量降低加工时的每齿切削量从而达到减小刀刃切削力的目的,其原理与高速加工的原理类似。

## 钛合金航空结构件高效加工技术

### 1 钛合金铣面加工

对钛合金零件进行铣面加工时,采用小切深、大进给的铣削方式获得高效加工。大进给铣削的原理是通过减小刀具主偏角,使刀具在很高的进给下仍然能保持很小的切屑厚度,以减小高进给时的切削力,实现在低

切削速度下获得很大的进给量,增加单位切深下的金属切除率。在同样的切屑厚度下,大进给铣刀的进给量接近普通圆柱立铣刀的6倍,大大提高了金属切除率。同时由于该类刀具切削时其切削力部分垂直向上,切向力较小,消耗的功率也较小,因此该加工方法对机床的功率和刚性要求不高,应用非常广泛。

粗加工过程中,尽量保证刀具持续稳定切削,刀具轨迹应当尽量消除尖角,在转弯处应当适当加圆角,使得加工过程更为平稳,一般圆角半径不小于刀具直径的15%。

## 2 钛合金槽腔加工

槽腔是钛合金航空结构件的一个主要特征,材料去除率高,工作量大,因此槽腔加工是实现钛合金零件高效加工的关键(见图6)。大切深、低转速、低进给的强力切削以获得最大金属去除率是钛合金粗加工的有效方法。目前粗加工钛合金的强力铣削刀具以玉米铣刀的效率最高而得到广泛采用。例如山特维克玉米铣刀切槽试验时,最大切深可达109mm,最大切宽可达66mm,其金属

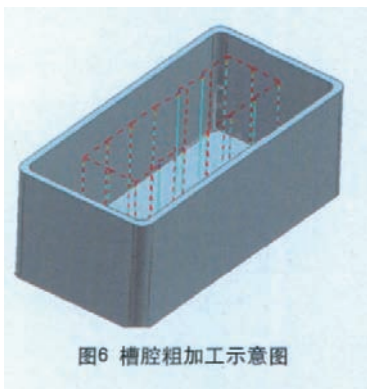


图6 槽腔粗加工示意图

去除率高达 $409\text{cm}^3/\text{min}$ 。

对于槽腔粗加工的加工工艺方法,一般先采取U钻预钻孔,然后再用玉米铣刀去除余量,可以获得很高的金属去除率。

## 3 圆角加工技术

为减轻飞机重量,飞机结构件的槽腔转角处圆角通常较小,需要用直径较小的铣刀进行加工。由于在圆

角处切削量突变,导致切削力变化非常大。在切削力突变的情况下,刀具容易产生振动,甚至出现崩刃现象,导致刀具磨损严重,加工效率低下。

传统的圆角加工策略是通过细化轨迹的方法来避免圆角处加工振动的问题,其缺点是轨迹过多,效率比较低,圆角的加工占掉30%甚至更多的精加工时间。插铣是解决转角加工效率问题的最佳途径。插铣是一种沿刀具轴向进行的类似于钻孔的一种轴向铣削方法,由于插铣的走刀方向沿着刀轴方向,所以其切削力大部分将沿着刀轴方向,径向切削力很小,因而在插铣时比常规铣削振动小,而且其走刀方式去除转角余量的效率高。通过不同直径的插铣刀具对转角处进行插铣,可切除大部分转角余量,再用立铣刀对插铣产生的残留进行清除,可以大幅度提高加工效率。

## 4 精密侧铣技术

在传统切削方法中,切削速度基本在 $40\sim 60\text{m}/\text{min}$ ,钛合金的高速铣削将其切削速度定义在 $120\text{m}/\text{min}$ 以上。在精加工侧壁的时候,利用铣削的断续性来达到高速切削的目的,以提高零件表面质量及加工效率。精加工侧面的时候,由于切宽小,刀齿每转过一周的切削时间很短,即冷却时间很长。在冷却充分的情况下,其切削温度能得到有效地控制,因而可以大幅提高切削速度来提高加工效率,如图7、图8所示。

用PVD涂层的整体硬质合金铣刀或超密齿硬质合金铣刀进行钛合金的高速切削精加工,可以大幅提高加工效率和加工精度。

## 5 仿真优化技术

钛合金飞机结构零件加工特征复杂,在粗加工时切削余量会不断变化,如转角部位的余量突变等。目前的CAM软件所编制的NC程序往往只能设置固定的切削参数,为



图7 精铣周边示意图

为了避免局部程序由于切削量过大造成对刀具、机床的冲击,通常方法是通过降低整体切削参数来保证刀具寿命和零件质量,从而加工效率极为低下。基于Vericut的仿真优化技术则可很好地解决该问题。通过Vericut软件设置切削参数优化库,并用软件进行仿真,通过仿真对实际加工余量和切削条件进行预测,根据加工余量和切削条件对程序中的切削参数进行优化。既延长了刀具寿命,

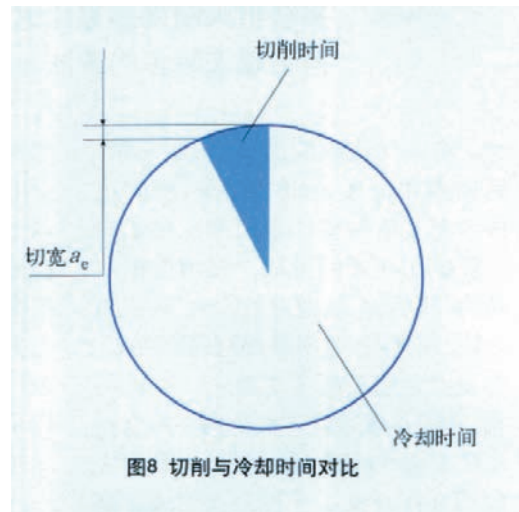


图8 切削与冷却时间对比

保证了零件质量,也提高了加工效率。

## 结束语

钛合金航空结构件的高效数控加工是目前航空制造业面临的难题之一。数控设备、加工工具和工艺方案3个方面目前的技术远远不能满足钛合金航空结构件的加工需求,这必将成为数控加工行业今后的研究热点,钛合金航空结构件的高效数控加工的需求也是推动数控技术发展的源泉。(责编 玉龙)